

(3)

Corr US 6,522,818 B1

(19)日本国特許庁 (JP)

## (12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2000-347228

(P2000-347228A)

(43)公開日 平成12年12月15日 (2000.12.15)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

G 0 2 F 1/35

識別記号

F I

G 0 2 F 1/35

テマコード(参考)

2 K 0 0 2

審査請求 未請求 請求項の数10 O L (全 19 頁)

(21)出願番号 特願平11-239222

(22)出願日 平成11年8月26日 (1999.8.26)

(31)優先権主張番号 特願平11-85968

(32)優先日 平成11年3月29日 (1999.3.29)

(33)優先権主張国 日本 (JP)

(71)出願人 000005290

古河電気工業株式会社

東京都千代田区丸の内2丁目6番1号

(72)発明者 麻生 修

東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古

河電気工業株式会社内

(72)発明者 忠隈 昌輝

東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古

河電気工業株式会社内

(72)発明者 並木 周

東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古

河電気工業株式会社内

Fターム(参考) 2K002 AB12 AB30 BA01 CA15 DA10

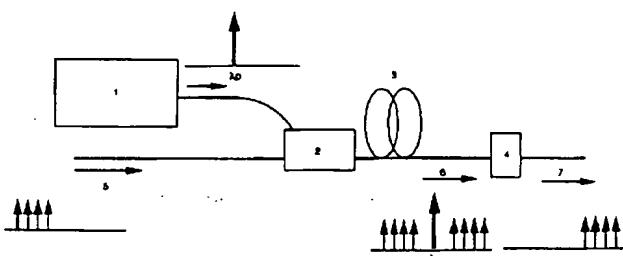
HA21 HA31

(54)【発明の名称】光ファイバ中の四光子混合方法およびそれを用いた短パルス発生装置

## (57)【要約】

【課題】プロープ光とポンプ光を光ファイバ中に導入してアイドラー光を得る四光子混合方法において、光ファイバ長を適切にしないと効率良くアイドラー光を得る出来なかつた。

【解決手段】光ファイバの非線形係数、単位距離当たりの損失、プロープ光とポンピング光との波長及び強度などが特定の値に設定されている場合に、光ファイバ長に対する光ファイバ出力端でのアイドラー光変換効率が極大値と極小値とを持つ周期関数となるが、その光ファイバ長を前記極大値をもつ最小光ファイバ長以下に設定することに特徴を有する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】周波数軸上にプローブ光fs、ポンプ光fpを $f_p \neq f_s$ の条件で配置された両光を光ファイバに入射し、光ファイバの中で四光子混合を行う方法において、前記光ファイバ長zが下記A及びBにより求まるL<sub>max</sub>、L<sub>mi</sub>\*

$$\frac{dE_p}{dz} + \frac{1}{2}\alpha E_p = i\gamma \left[ \left( |E_p|^2 + 2|E_s|^2 + 2|E_c|^2 \right) E_p + 2E_p^* E_s E_c \exp(i\Delta\beta z) \right], \quad (2.1)$$

$$\frac{dE_s}{dz} + \frac{1}{2}\alpha E_s = i\gamma \left[ \left( |E_s|^2 + 2|E_c|^2 + 2|E_p|^2 \right) E_s + E_s^* E_c E_p \exp(-i\Delta\beta z) \right], \quad (2.2)$$

$$\frac{dE_c}{dz} + \frac{1}{2}\alpha E_c = i\gamma \left[ \left( |E_c|^2 + 2|E_p|^2 + 2|E_s|^2 \right) E_c + E_s^* E_p E_c \exp(-i\Delta\beta z) \right]. \quad (2.3)$$

とする。ここでEは電場を示し、添字のp、s、cは各々ポンプ光、信号光（プローブ光）、波長変換光（アイドラー光）であり、 $\alpha$ は光ファイバの単位距離当たりの損失であり、 $\gamma$ は非線形係数であり、 $\gamma$ はポンプ光波長 $\lambda_p$ と※

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda_p} \cdot \frac{n_2}{A_{eff}}. \quad (3)$$

$\Delta\beta$ は伝搬定数の位相不整合であるが、周波数的には位相整合条件

$$2\omega_p = \omega_s + \omega_c. \quad \star \quad (4)$$

を満たし、（ここで $\omega$ は角周波数であり、周波数fとは $\omega=2\pi f$ の関係がある）且つこの $\Delta\beta$ は

$$\Delta\beta(\omega_s) = -\frac{\lambda_p^2}{2\pi c} D(\lambda_p)(\omega_s - \omega_p)^2. \quad \star \quad (5)$$

を満足し、ここで、Dは光ファイバの波長分散係数であり、通常はps/nm/kmの単位で表され、cは真空中の光の速さである。上記微分方程式をファイバの長手方向の座標zに対して0.1%以下の計算誤差以下の精度でEs及びEcを光ファイバの全長Lに渡って積分し、その絶対値の2乗を計算して、それぞれPs(Z)、Pc(Z)を求める。この解を用いてアイドラー光の変換効率Gcはファイバの出射端で測定されたアイドラー光強度Pc(L)と、ファイバの入射端におけるプローブ光の強度Ps(0)の比で計算する。またプローブ光利得Gsはファイバの出射端で測定されたプローブ光強度Ps(L)と、ファイバの入射端におけるプローブ光の強度Ps(0)の比で計算する。PsとPcは各々プローブ光およびアイドラー光の強度であり、ファイバ中の入射端からの距離Zを引数とする関数で表す。Lは考えているファイバの全長である。この計算を行った際には、横軸を距離zとして、縦軸がプローブ光の利得またはアイドラー光の変換効率として計算結果をグラフ化できる。計算の対象となるzを十分大きい有限の値にとれば、解の一般的な性質として、アイドラー光の変換効率の長手方向の変化は周期的に振動する。この周期的な振る舞いで

\* nで $L_{min} \leq z \leq L_{max}$ を満足するように構成されていることを特徴とする光ファイバ中の四光子混合方法。

A. 光ファイバ中の四光子混合を記述する非線形常微分方程式を、

## 【数1】

$$\frac{dE_p}{dz} + \frac{1}{2}\alpha E_p = i\gamma \left[ \left( |E_p|^2 + 2|E_s|^2 + 2|E_c|^2 \right) E_p + 2E_p^* E_s E_c \exp(i\Delta\beta z) \right], \quad (2.1)$$

$$\frac{dE_s}{dz} + \frac{1}{2}\alpha E_s = i\gamma \left[ \left( |E_s|^2 + 2|E_c|^2 + 2|E_p|^2 \right) E_s + E_s^* E_c E_p \exp(-i\Delta\beta z) \right], \quad (2.2)$$

$$\frac{dE_c}{dz} + \frac{1}{2}\alpha E_c = i\gamma \left[ \left( |E_c|^2 + 2|E_p|^2 + 2|E_s|^2 \right) E_c + E_s^* E_p E_c \exp(-i\Delta\beta z) \right]. \quad (2.3)$$

※非線形屈折率n<sub>2</sub>と有効コア断面積A<sub>eff</sub>との関係が以下の式を満足し、

## 【数2】

★ 【数3】

## ☆ 【数4】

解が極大値をとるzの値は離散的かつ有限個存在する。このうちで最もzが小さい時の値をz=L<sub>m</sub>とおく。更にz>L<sub>m</sub>の条件を満たし、L<sub>m</sub>よりも10%長い距離をz=L<sub>max</sub>とおく。

40

B. 次に、上記数1については適当な条件の元で二つの異なる近似解が知られている。本願では、便宜上各々を考案者の名前の頭文字をとってSB解（Stolen and Bjorkholm）[8]およびHJKM解（Hill、Johnson、Kawasaki and MacDonald）[24]と称す。アイドラー光の変換効率Gcはファイバの出射端で測定されたアイドラー光強度Pc(L)と、ファイバの入射端におけるプローブ光の強度Ps(0)の比で与えられる。またプローブ光利得Gsはファイバの出射端で測定されたプローブ光強度Ps(L)と、ファイバの入射端におけるプローブ光の強度Ps(0)の比で与えられる。PsとPcは各々プローブ光およびアイドラー光の強度であり、ファイバ中の入射端からの距離Zを引数とする関数で表す。Lは考えているファイバの全長である。結果だけを示すと、各々の近似解から得られる信号光利得Gsとアイドラー光の発生効率Gcは以下のように表される。

(イ) SB解

(イ-1)  $4\gamma P_p > -\Delta\beta$  の場合

3

(3)

\* \* 【数5】

$$G_s = 1 + \gamma^2 P_p^2(0) L^2 \left[ \frac{\sinh(g_a L)}{g_a L} \right]^2$$

(6.1.1.a)

$$G_c = \gamma^2 P_p^2(0) L^2 \left[ \frac{\sinh(g_a L)}{g_a L} \right]^2$$

(6.1.1.b)

ここで

$$g_a = \frac{1}{2} [-\Delta\beta(\Delta\beta + 4\gamma P_p)]^{1/2}$$

(6.1.2)

である。次に

(イ-2)  $4\gamma P_p < -\Delta\beta$  の場合

※※【数6】

$$G_s = 1 + \gamma^2 P_p^2(0) L^2 \left[ \frac{\sin(g_b L)}{g_b L} \right]^2$$

(6.2.1.a)

$$G_c = \gamma^2 P_p^2(0) L^2 \left[ \frac{\sin(g_b L)}{g_b L} \right]^2$$

(6.2.1.b)

ここで

$$g_b = \frac{1}{2} [\Delta\beta(\Delta\beta + 4\gamma P_p)]^{1/2}$$

(6.2.2)

である。

(ロ) HJKM解

★30★【数7】

$$G_s \equiv \frac{P_s(L)}{P_s(0)} = \exp(-\alpha L)$$

(7.1)

$$G_c \equiv \frac{P_c(L)}{P_c(0)} = \gamma^2 P_p^2(0) e^{-\alpha L} \frac{(1 - e^{-\alpha L})^2 + e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta L / 2)}{\alpha^2 + \Delta\beta^2}$$

(7.2)

となる。以上の式においてファイバ長Lをzと見なして計算結果を描けば、数1を解いたときのように横軸が距離zで、縦軸がアイドラー光の変換効率Gcになる様な図を描ける。ここで、解の一般的な性質としてzが先述のLmaxよりも小さく、しかし0よりも大きい値において、数1を数値的に解いて得られる解と数5乃至は数6(SB解)乃至は数7(HJKM解)のいずれもが計算誤差よりも大きな1%以上の差を生じる。これらの差が生じるzの値は最大でも2つの異なる値をとる。その中で最も大きい値をz=Lminとする。

【請求項2】周波数軸上にプローブ光fs、ポンプ光fpをfp≠fsの条件で配置された両光を光ファイバに入射し、光ファイバの中で四光子混合を行う方法において、ポンプ光と信号光の入射偏光状態を揃えて入射するととも

に、入射時に偏光状態を揃えて光ファイバに入射したポンプ光とプローブ光とがファイバ中を伝搬する際にデボラライズや分散の影響を受けない短い長さに光ファイバ長を設定し、ポンプ光の周波数fpを固定した際に、

【数8】

$$|f_p - f_s| \leq \Delta f$$

の条件をほぼ満足する周波数領域にプローブ光を立てて四光子混合を発生させることを特徴とする光ファイバ中の四光子混合方法。

【請求項3】ポンプ光と信号光の入射偏光状態を揃えて入射するとともに、入射時に偏光状態を揃えて光ファイバに入射したポンプ光とプローブ光とがファイバ中を伝搬する際にデボラライズや分散の影響を受けない短い長

さに光ファイバ長を設定したことを特徴とする請求項1記載の光ファイバ中の四光子混合方法。

【請求項4】波長変換装置として用いられることを特徴とする請求項1ないし3のいずれかに記載の光ファイバ中の四光子混合方法。

【請求項5】光パラメトリック増幅器として用いられることを特徴とする請求項1ないし3のいずれかに記載の光ファイバ中の四光子混合方法。

【請求項6】位相共役光発生装置として用いられることを特徴とする請求項1ないし3のいずれかに記載の光ファイバ中の四光子混合方法。

【請求項7】光信号再生回路として用いられることを特徴とする請求項1ないし3のいずれかに記載の光ファイバ中の四光子混合方法。

【請求項8】多波長光源として用いられることを特徴とする請求項1ないし3のいずれかに記載の光ファイバ中の四光子混合方法。

【請求項9】周波数軸上にプローブ光 $fs$ 、ポンプ光 $fp$ を $fp \neq fs$ の条件で配置された両光を光ファイバに入射し、光ファイバの中で四光子混合を行う方法において、光強度 $P_p$ を有するポンプ光と、光強度 $P_s$ を有するプローブ光を用いて、周波数 $f_c$ 及び光強度 $P_c$ を有するアイドラー光を光ファイバ中で発生させるとともに、光ファイバへの入射プローブ光の光強度 $P_s$ に対する光ファイバからの出射アイドラー光強度 $P_c$ で定義される変換効率 $G_c$ を座標軸の縦軸にとり、光ファイバの長さを横軸にとって描いた特性図上で、変換効率 $G_c$ が最初の極大値近辺となる光ファイバ長に選定されていることを特徴とする光ファイバ中の四光子混合方法。

【請求項10】分散シフト光ファイバとシングルモード光ファイバとを交互に接続した伝送路にポンプ光とプローブ光とを入射し、分散シフト光ファイバ内で多重の四光子混合を発生させて自己位相変調が支配的であるスペクトルの広がった周波数チャープを発生させ、シングルモード光ファイバ内で前記スペクトルの広がった光のパルスを圧縮し、これを繰り返させることによりソリトン形状の短パルスを発生させる短パルス発生装置において、前記分散シフト光ファイバ内で請求項1乃至3のいずれかに記載の四光子混合方法を用いることを特徴とする短パルス発生装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光ファイバ中で四光子混合を起こし周波数変換光を発生させる光ファイバ中の四光子混合方法及びそれを用いた短パルス発生装置に関し、ファイバ型波長変換装置、ファイバ型光パラメトリック増幅器、ファイバ型位相共役光発生装置等の光ファイバ型非線形デバイスに用いられる。

【0002】

【従来の技術】光ファイバ中の四光子混合は、ファイバ

10 材料の三次の非線形分極に起因して生じる。本願で取り扱うのは、特に、周波数 $fs$ のプローブ光（又は信号光）、 $fp$ のポンプ光が存在する際に、周波数 $f_c$  ( $=2fp-f_s$ ) のアイドラー光（変換光）が発生する現象である。この現象は光波としては3つの異なる周波数の波動が寄与するために3波混合と呼ばれている。3波混合を用いれば、入射してくる周波数 $fs$ の信号光に対して周波数軸上の適当な位置 $fp$ にポンプ光を立てる事により、所望の周波数 $f_c$ の周波数変換光を発生することが可能である。3波混合を高い発生効率で引き起こすことを実現した装置は、光通信の分野ではファイバ型非線形デバイスとして利用されている。具体的な利用法として、光波長変換装置[1-6]、光パラメトリック増幅器（OPA:Optical Parametric Amplifier）[8-11]、パルス圧縮[2]、位相共役光の発生[7]、光信号再生回路[12]、波長多重通信へ用いるための多波長光源[13]等が挙げられる。

20 【0003】以上に述べた現象は、ポンプ光が二つの異なる周波数 $f_1$ 、 $f_2$ に存在する場合にも起きる。以後本願では、便宜上ポンプ光が一つの周波数の場合の現象を3波混合（TWM:Three Wave Mixing）、ポンプ光が二つの異なる周波数にある場合の現象を4波混合（Four Wave Mixing）と称す。どちらの現象も量子論的には4つの光子が相互作用するという、同一の枠組みの中で議論される。このため、両方のどちらにも当てはまる議論を行う際は四光子混合（FPM:Four Photon Mixing）と統一的に呼ぶ事にする。

【0004】一般にはファイバの零分散波長とポンプ光の波長を波長軸上で一致させることで、最適な状況でFPMを実現させる事が可能である。これは伝搬定数 $\beta$ に関する位相整合条件が満足するためである[8]。光ファイバの分散がポンプ光の波長において異常分散領域にあり、かつポンプ光強度が十分に強い場合には、自己位相変調（SPM:Self Phase Modulation）や相互位相変調（XPM: Cross Phase Modulation）の効果が位相整合条件のズレを引き起す。これにより、光ファイバの異常分散領域においてポンプ光の強度に依存した位相整合が達成されることも確認されている[14]。

40 【0005】光ファイバ中のFPMを利用したデバイスには色々な用途がある。例えば、波長多重通信における光ネットワークの構築という観点で考えた際には波長変換が考えられる。この際には変換効率の波長依存性が少ない形で広帯域の信号光を一括して変換すること、および変換による損失が少ない事が望まれる[4]。これは物理的には光ファイバ中において三次の非線形効果をいかに広い帯域でいかに高効率で発生させるか、という事と同値である。この目的のためには以下の二つの方法、およびその組み合わせが考えられる。（1）出来る限り強いポンプ光を入力する、または単位長さ当たりの非線形性が強い光ファイバを利用して非線形効果を引き起す。（2）ファイバ長を長くして、ファイバの中で光が非線

7  
形相互作用をする時間を稼ぐことで非線形効果を引き起こす。この二つの考え方の中で、(1)の考え方は非常に重要である。

【0006】ファイバを短尺化すると、ファイバ中における分散のゆらぎを押さえすることになる。文献[6, 7]では、相互作用長の足りない分を補うために、零分散波長がほぼ同じ所にある250m長の高非線形分散シフト光ファイバ(HN-DSF:High Nonlinear Dispersion Shifted Fiber)を三本用意して、接続することによりファイバ長(ファイバ中での光の非線形相互作用長)を稼いでいる。各々の光ファイバの非線形性が強いため、総計750mのファイバ長であっても有効なFPMを引き起こすことが出来る。

【0007】光ファイバを短尺化する理由としては、その他にも誘導ブリュアン散乱(SBS:Stimulated Brillouin Scattering)の抑制、偏光の違いによるFPM発生効率の劣化の抑制、損失の低減化、という様々な利点を含んでおり、現在では上記(2)よりも実用的に有利だと考えられている。これまで述べたように、FPM媒質である光ファイバを短尺化することで、波長変換装置やOPA等のFPMを積極的に利用したファイバ型デバイスを実現することが可能である。現在では、短尺化された光ファイバ

$$P_p \geq P_{th} = -\frac{\Delta\beta}{4\gamma},$$

【0010】で示される。ポンプ光強度 $P_p$ をしきい値 $P_{th}$ よりも大きくとることで、高い変換効率を有する波長変換が実現する。ここでポンプ光波長でのファイバの分散が異常分散である場合に限って $\Delta\beta < 0$ になるので数5は物理的な意味を持つ。以上の事は、基本的にはStolenとBjorkholmによって与えられたTWMの近似解[8, 9]より導出される。

#### 【0011】

【発明が解決しようとする課題】ところが上述の議論を行う際に、入力するポンプ光が実際には無尽蔵に大きくすることは出来ない事に注意する必要がある。これは光源の仕様によって規定される値である。手元にあるポンプ光源の出力が $P_{th}$ 以下であった場合には上記波長変換は実現しない。また誘導ブリュアン散乱(SBS:Stimulated Brillouin Scattering)のために、実際には光ファイバ中にあまりにも強い光を入射することも不可能である。

【0012】次に、たとえ高非線形光ファイバを用いたとしても、光ファイバの長さをどこまでも短くする事は出来ない。限られた入力ポンプ光強度 $P_p$ の大きさに対して、ファイバの中で光が十分非線形相互作用をする程度の長さは確保する必要がある。当然ファイバ長が長いほど、光にとっては十分に非線形相互作用を行うための時間が増える。したがって、ポンプ光源の出力が有限である限り、ある程度ファイバ長が長くなければFPMを有効

\* バにより大きな非線形性を持たせるために高非線形光ファイバの開発が競って行われている[15-17]。さて実際に上述の高非線形光ファイバを用いて波長変換装置を作成する際には、与えられた長さで、しかも与えられた単位長当たりの非線形性を有する高非線形光ファイバと、仕様で制限された最大出力を有するポンプ光の光源があり、それらを組み合わせて波長変換装置を作成することになる。この時に与えられたファイバと光源とで所望の特性を満足する波長変換装置を構成するための条件を考えなくてはならない。

【0008】この問題に対して、例えば文献[1-3]において、この発明者らはファイバ長を一定とした場合に入力するポンプ光強度の最小値を与える、という回答を与えている。この最小値は、光ファイバの異常分散領域において光パラメトリック增幅が発生するために必要なポンプ光のしきい値に対応する。この値は具体的には、TWMを起こす際の信号光の周波数とポンプ光の周波数、およびファイバ中の光の伝搬定数で決まり、伝搬定数の位相不整合 $\Delta\beta$ とファイバの非線形係数 $\gamma$ を用いて

#### 【0009】

#### 【数9】

#### (1)

に発生させることはできない。実際に前出の文献[6, 7]においては、非線形相互作用をするのに十分なファイバ長を稼ぐために、3本の光ファイバを接続して用いている。

【0013】一体、ファイバ長をどこまで短くすることが出来るのか、逆に言えばどこまで長くする必要があるのかという事がこれまで指摘されていなかった。例えば前出の数9をみても、ファイバ長は式の中にパラメータとして現れていない。したがって、この式から最適なファイバ長に関する情報を得ることは不可能である。

【0014】さらに、ファイバ長を短尺化させなくてはならない理由の一つに偏波モード分散(PMD: Polarization Mode Dispersion)の問題がある。この問題は光通信で言うところのPMDとは少し違う意味合いである。もちろん、光通信における信号光の劣化を防ぐという文脈においてもPMDが小さくなるのは望ましい。ここで特に意味するのは、FPMの発生効率及び帯域に関するPMDの影響の問題である。Inoueによる解析[18]ではFPMによるアイドラー光の発生において、ポンプ光とプローブ光の偏光が互いに揃っている場合には発生効率が最も高い。しかし、ある種の組み合わせでは0(つまり、アイドラー光は発生しない)になる事が示されている。したがって、波長変換デバイスやOPAの様なデバイスの構成にはいかにして偏光を揃えるかが大きな問題になる。

【0015】さて、いまファイバの入り口でポンプ光と

9  
プロープ光の偏光を揃えるとする。光ファイバが偏波保持ファイバならば、そのまま出口まで同じ偏光状態が保持されるので全く問題はない。文献[4, 5]では、実際にこの様にして広帯域の波長変換装置を作り上げている。しかし、もしも（一般にはそうだが）偏波保持ファイバでなければどうなるであろうか？一般にある波長の光、例えばポンプ光、に注目してみるとファイバ中を伝搬している間に複屈折により偏光状態を変えていく。任意の偏光状態は、任意の直交する二つの偏光の重ね合わせで記述できる。今、この直交する偏光状態として主偏光状態 (PSP:Principal State of Polarization) を選ぶとする。この選び方は一般的である[19, 20]。入射偏光状態（任意の偏光状態）はPSPを選択したときの位相を $\phi_p$ とし、出射端での位相を $\phi_s$ とする。この議論から、せっかく入射端で偏光状態を揃えて入射したとしても、出射端では異なった偏光状態として出てくることになる。この問題は特に広帯域の波長変換やOPAを実現させようとして $\lambda_s$ と $\lambda_p$ の差が大きくなればなるほど深刻になる。それは $\phi_s$ と $\phi_p$ の差が\*

$$\frac{dE_p}{dz} + \frac{1}{2}\alpha E_p = i\gamma \left[ \left( |E_p|^2 + 2|E_s|^2 + 2|E_c|^2 \right) E_p + 2E_p^* E_s E_c \exp(i\Delta\beta z) \right], \quad (2.a)$$

$$\frac{dE_s}{dz} + \frac{1}{2}\alpha E_s = i\gamma \left[ \left( |E_s|^2 + 2|E_c|^2 + 2|E_p|^2 \right) E_s + E_s^* E_c E_p \exp(-i\Delta\beta z) \right], \quad (2.b)$$

$$\frac{dE_c}{dz} + \frac{1}{2}\alpha E_c = i\gamma \left[ \left( |E_c|^2 + 2|E_p|^2 + 2|E_s|^2 \right) E_c + E_c^* E_p E_s \exp(-i\Delta\beta z) \right]. \quad (2.c)$$

【0019】ここでEは電場を表す。添字のp、s、cは各々ポンプ光、信号光（プロープ光）、波長変換光（アイ

40 ドラ光）を表す。 $\alpha$ は光ファイバの単位距離当たりの損失であり、 $\gamma$ は非線形係数である。

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda_p} \cdot \frac{n_2}{A_{eff}}$$

また、数10において $\Delta\beta$ は伝搬定数の位相不整合であるが、周波数的には位相整合条件

$$2\omega_p = \omega_s + \omega_c.$$

\* 大きくなるからに他ならない。一般には $\Delta\tau$ は波長に依存するであろうし、PSPも波長に依存するので更に事態は悪くなる。ただしファイバ長を短くするとPMDは小さくなるし、 $\Delta\tau$ やPSPも揃うことが知られている[21]。この意味でも、広帯域の波長変換装置を作成するにはファイバ長を短くするにこした事はない。しかし、前出の分散の長手方向やSBSしきい値の時と同じく、具体的には何を基準にしてファイバの長さを決定すべきかは議論されていない。

10 20 【0016】以上の議論で光ファイバ中で高い効率で四光子混合を発生させる際に、(I) ポンプ光の強度に見合って、十分非線形相互作用が起こせるほどのファイバ長がなくてはならないこと、および (II) PMDの効果を低減させるためには四光子混合を発生させる帯域に応じてある程度短いファイバを使う必要があることを指摘した。この議論を踏まえた上で、本願では、与えられたポンプ光源のパワーの元でファイバ長をどの様にして短尺化させればよいのか、またどの程度の長さを確保すれば効率がよい四光子混合が発生するのか、という問題に対する回答を提供する。

## 【0017】

【課題を解決するための手段】問題を解決するための手段として、まず近似解ではなく厳密な解析を行う必要があると考えた。TWMを記述する微分方程式は、定常状態（極限として連続光を取り扱う場合）には、以下の非線形連立常微分方程式系で記述される[9, 24]。

## 【0018】

## 【数10】

(2.a)

(2.b)

(2.c)

※ pと非線形屈折率n2と有効コア断面積Aeffを用いて以下のように表される。

## 【0020】

## 【数11】

(3)

## ★ 【0021】

## ★ 【数12】

(4)

## 【0022】

## 【数13】

11

$$\Delta\beta(\omega_s) = -\frac{\lambda_p^2}{2\pi c} D(\lambda_p)(\omega_s - \omega_p)^2$$

(5)

【0023】で与えられる。ここで、Dは光ファイバの波長分散係数であり、通常はps/nm/kmの単位で表される量である。cは真空中の光の速さである。数12の意味は、波長軸（又は周波数軸上で）ポンプ光の位置を決めた場合に、 $\omega_s$ の角周波数を有する信号光を設定することで得られるアイドラ光の周波数は一意に決まるという事である。数13はこの状況下での伝搬定数の位相整合条件のズレである。位相整合条件のズレが及ぼす変換効率の劣化を計算する事から、波長変換装置の帯域を決定できる。

【0024】数10は、連続光だけでなく、ある程度はパルス化した際の光の現象の記述にも使えることが示されている[1-3]。数10は常微分方程式系なので、適当な初期条件の元でRunge-Kutta法などを用いて数値的に積分を実行することが出来る。方程式系は電場についての方程式なので、一般には初期条件は光の強度と位相に関するものである。しかし、初期に変換光（アイドラ光）の振幅が0である系に関しては上記の議論は成り立たない。この場合に限っては、初期位相の効果は無視できる[24]。また、そうでなければFPMを利用した非線形デバイスは非常に不安定で使いにくいものになる。そこで、初期条件としてポンプ光の強度と信号光（プローブ光）の強度を与えることによって計算が実行できる。この時、各初期位相は全て0とおけばよい。この様にして、誤差\*

$$G_s = 1 + \gamma^2 P_p^2(0) L^2 \left[ \frac{\sinh(g_a L)}{g_a L} \right]^2$$

(6.1.1.a)

$$G_c = \gamma^2 P_p^2(0) L^2 \left[ \frac{\sinh(g_a L)}{g_a L} \right]^2$$

(6.1.1.b)

ここで

$$g_a = \frac{1}{2} [-\Delta\beta (\Delta\beta + 4\gamma P_p)]^{1/2}$$

(6.1.2)

である。次に

【0028】(イ-2)  $4\gamma P_p < -\Delta\beta$  の場合

【数15】

\* が  $10^{-6}$  程度の精度で数値計算を実行して議論を行う。誤差は数10から得られる二つの保存量を評価して決定した。

【0025】数10を適當な条件の元解いた際に、アイドラ光の発生効率を用いて以下の議論を行う。数10については適當な条件の元で二つの異なる近似解が知られている。本願では、便宜上各々を考案者の名前の頭文字をとってSB解 (Stolen and Bjorkholm) [8] およびHJKM解 (Hill, Johnson, Kawasaki and MacDonald) [24] と称す。アイドラ光の変換効率  $G_c$  はファイバの出射端で測定されたアイドラ光強度  $P_c(L)$  と、ファイバの入射端におけるプローブ光の強度  $P_s(0)$  の比で与えられる。またプローブ光利得  $G_s$  はファイバの出射端で測定されたプローブ光強度  $P_s(L)$  と、ファイバの入射端におけるプローブ光の強度  $P_s(0)$  の比で与えられる。 $P_s$  と  $P_c$  は各々プローブ光およびアイドラ光の強度であり、ファイバ中の入射端からの距離を引数とする関数で表す。Iは考案しているファイバの全長である。結果だけを示すと、各々の近似解から得られる信号光利得  $G_s$  とアイドラ光の発生効率  $G_c$  は以下のように表される。

【0026】(イ) SB解

(イ-1)  $4\gamma P_p > -\Delta\beta$  の場合

【0027】

【数14】

$$G_s = 1 + \gamma^2 P_p^2(0) L^2 \left[ \frac{\sin(g_b L)}{g_b L} \right]^2, \quad (6.2.1.a)$$

$$G_c = \gamma^2 P_p^2(0) L^2 \left[ \frac{\sin(g_b L)}{g_b L} \right]^2, \quad (6.2.1.b)$$

ここで

$$g_b = \frac{1}{2} [\Delta\beta (\Delta\beta + 4\gamma P_p)]^{1/2}, \quad (6.2.2)$$

である。

【0029】 (口) HJKM解

【0030】

$$G_s \equiv \frac{P_s(L)}{P_s(0)} = \exp(-\alpha L),$$

\* 【数16】

\*

(7.1)

$$G_c \equiv \frac{P_c(L)}{P_c(0)} = \gamma^2 P_p^2(0) e^{-\alpha L} \frac{(1 - e^{-\alpha L})^2 + e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta L / 2)}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \quad (7.2)$$

となる。これらの解はどちらもFPMを利用したデバイスの設計や解析でよく用いられている[2、3、6]。

【0031】 (口) 作用

ここでは、(イ)で議論を行った数10から数16までを用いて具体的に最適なファイバ長を決定する方法を示す。既に報告されている様にStolen and Bjorkholmの解析を元にした議論[1-3]では、解の振る舞いは(A) ファイバの異常分散領域にポンプ光波長が設置され、数9で与えられるしきい値以上の強度のポンプ光が入力されている場合、(B) ファイバの異常分散領域にポンプ光波長が設置され、数9で与えられるしきい値よりも小さな強度のポンプ光が入力されている場合、(C) ファイバの正常分散領域にポンプ光波長が設定されている場合、の3つがある。

【0032】 図4～9は以上の近似解と、数10を直接数値積分して解いた解との比較を3つの典型的な場合で示す。

(A) 異常分散領域でポンプ光強度が数9のしきい値よりも大きい場合を図4に示す。図4はプローブ光利得計算結果、図5はアイドラー光利得計算結果を示す。これら各図から分かるように、ファイバ長が短い場合には全ての解が一致しているが、ファイバ長が長くなると3つの解は異なる結果を与える。図5に示したように、二つの近似解のうち数値解と比較してよりファイバ長が長いところまで差が少ない方の解について、その解が数値解と0.1dBの誤差を生じる距離をLminとおく。また、同5において数値解が極大値をとる距離の中で最も短い距離

の値をLmax. とおく事にする。図4を用いても同様に定義できるので、実際のデバイスの作成において利用する方のグラフからLminとLmax. を読みとればよい。例えば、OPAを作るならばプローブ光利得のグラフからLminとLmax. を決定すればよいし、光波長変換装置を作るならばアイドラー光変換効率のグラフからLminとLmax. を決定すればよい。この様な特徴的な長さのパラメータLminとLmax. は、残る二つの場合でも定義できる。図6、7および図8、9にその事を示す。

【0033】 (B) 異常分散領域でポンプ光強度が数9のしきい値よりも小さい場合を図6、7に示す。図6、7には異常分散領域において、ポンプ光が数9のしきい値よりも小さい場合の計算結果を示す。図6はプローブ光利得計算結果、図7はアイドラー光利得計算結果を示す。図6、7より分かるようにこの場合にはSB解は振動する。この場合に、但しSB解は損失の効果を含まないの

で[8、9]、数値解とのズレが生じる。こうしてLmaxとLminを(A)の場合と同様に決定できる。

【0034】 (C) 正常分散領域の場合を図8、9に示す。図8、9には正常分散領域における典型的な計算結果を示す。図8、9を見れば分かるように、この場合もLmaxとLminを決定できる。図8はプローブ光利得計算結果、図9はアイドラー光利得計算結果を示す。

【0035】 以上の議論で分かるように、考えられる全ての場合において、数値計算を行いSB解やHJKM解と比較する事でLmaxとLminを決定する事ができる。この手順を踏むことでFPMを利用したファイバ型非線形デバイスに

用いるファイバの長さを  $L_{min} \leq L \leq L_{max}$  の範囲にすればよいことが分かる。 $L \geq L_{max}$  においても同様のプローブ光利得やアイドラー光変換効率を得る長さがあるが、やはりファイバ長が短い方が誘導ブリュアン散乱や後述する偏波モード分散、および分散の長手方向の変動のゆらぎを押さえられる。このために  $L \leq L_{max}$  の条件で使うのは本質的である。

【0036】また、SB解とHJKM解は常に良い近似になっているかというとそうではない。数14、数15、数16を見れば分かるように、これらの解の特徴は、プローブ光利得やアイドラー光発生効率がプローブ光の強度には依存しないことを特徴とする。実際にこの事を検証するために、図4、5に示した系と同じパラメータでポンプ光強度を20dBm (100mW) に固定して、プローブ光の入力強度を変えながら計算を行った結果を図10、11に示す。図10、11には各々プローブ光の強度を離散的に変えていった場合における、プローブ光の利得とアイドラー光の変換効率を示した。横軸はファイバ長であるが、 $LNL \equiv 1/\gamma P_p(0)$  で定義される非線形長さで正規化した。

【0037】図10はプローブ光の強度を変えながら計算したプローブ光利得を示す。(ポンプ光強度は20.0dBmに固定)

図11はプローブ光の入射強度を変えながら計算したアイドラー光変換効率を示す。(ポンプ光強度は20.0dBmに固定)

【0038】この図より分かるように、一般にはプローブ光の利得やアイドラー光の変換効率は、プローブ光の入射強度に依存する。しかし、入射光強度を小さくしていくと一定の曲線に漸近する事が分かる。この極限においてSB解やHJKM解のもつ、「プローブ光の利得やアイドラー光の変換効率は入射プローブ光強度に依存しない」という性質が成り立つと考える。したがって、SB解やHJKM解に基づいた議論は常に一般的の場合に適用できるわけではなく、最適なファイバ長も現実の状況の下で数10を聞く事によって始めて分かることになる。

【0039】以上の議論は専ら波長分散とポンプ光強度、FPMの発生効率についての議論であり、偏光の状態については考慮していないかった。

【0040】次に文献[4-7、10、11]で議論されているような広帯域のOPAや広帯域波長変換装置について考える。この場合についても、当然これまでの議論のようにFPMの発生効率を念頭にしてファイバ長を決める必要がある。しかし、更に前述のようにPMDの影響という立場でも考へる必要がある。DSFの解析[21、22]より、ファイバ長が短いほどPooleとWagnerにより提案されたFirst order近似[19]が成り立つ帯域が広くなることが分かる。この帯域は主偏光状態の帯域 (bandwidth of PSP's) と呼ばれることがある[21、22]。Poole and Wagnerの理論[19]によれば、複屈折の波長依存性にもかかわらず、主偏光状態の帯域幅内においてはいかなる波長の元でも主偏光状態は保持される事が示される。このために群遅延時間差としてのPMDが定義できるのである。

【0041】偏波保持ではない高非線形光ファイバを用いて広帯域波長変換または広帯域OPAを作成する際に、PMDの影響を出来るだけ少なくする事が必要である。したがって、主偏光状態の帯域幅よりも変換の帯域幅を小さくするようにファイバ長を短くすると、PMDによるFPMの影響を減少させることができると考える。この場合、ポンプ光と信号光を同じ偏光状態で入力し、しかもその偏光状態が二つの主偏光状態のどちらかであれば偏光の違いによるFPMの効率の劣化は最小限に避けられる。

【0042】ファイバ長が長く、主偏光状態の帯域幅よりも変換の帯域幅が大きいとする。この場合は仮にポンプ光と信号光を同じ偏光状態で入力したとしても、高次のPMDやデポラライズの効果が現れる[25]。このために、ポンプ光と帯域の一番端の（一番ポンプ光から離れた信号光の）偏光状態のズレがはげしくなってくる。

【0043】実際に文献[22]に示している手順を踏めば、主偏光状態の帯域幅を実験的に決定できる。この結果を用いて、主偏光状態の帯域幅よりも変換の帯域幅を小さくする、という立場からファイバ長を規定することが可能である。PMDによるファイバ長の制限よりも短い光ファイバを使うことを前提にして、これまでに述べてきたFPMの発生効率の議論を行えば、ファイバ長の最適化を更に進めることができる。更にポンプ光の強度を見直す情報も得られる。

#### 【0044】

【発明の実施の形態】A-1 発明の実施例（発明を具体化したものまたは最良の形態）

【実施例1】本実施例においては、本発明を具体化した波長変換装置の形態を示す。図1に考えられる波長変換装置の概念図を示す。ポンプ光源1から入射されるポンプ光は光信号5と光合波器2によって合波される。この合波された光は、長さを最適化された高非線形光ファイバ3の中でアイドラー光を発生する。このアイドラー光はFPM相互作用により信号光が波長変換された光である。ファイバの出射端では信号光とポンプ光とアイドラー光が周波数軸上に全て存在する光6が射出されるため、光フィルタ4を用いてアイドラー光7のみを取り出すようにする事で波長変換装置を実現できる。なお、この際のアイドラー光7は信号光5に対して位相共役でもあり、本装置は位相共役光の発生装置もかねている。

【0045】【実施例2】本実施例においては、本発明を具体化した光パラメトリック増幅装置の形態を示す。図2に考えられる光パラメトリック増幅装置の概念図を示す。ポンプ光源1から入射されるポンプ光は光信号5と光合波器2によって合波される。この合波された光は、長さを最適化された高非線形光ファイバ3の中でアイドラー光を発生しながら、信号光自身はパラメトリック増幅

効果により光強度が増幅される。ファイバの出射端では増幅された信号光とポンプ光とアイドラー光が周波数軸上に全て存在する光6が出射されるため、光フィルタ8を用いて増幅された信号光9のみを取り出すようにする事で光パラメトリック増幅器を実現できる。

【0046】[実施例3]本実施例においては、本発明を具体化した、光信号再生回路に用いる光回路の形態を示す。文献[12]に記されている如く、光再生回路は入力信号光に対して波形整形された光信号を出力し、あるいは時分割多重した光信号の抽出を行う装置である。同文献[12]の図面2にある光信号再生回路を構成する光回路は、文献[12]の本文中にあるように四光子混合を引き起こす高非線形媒質と、アイドラー光のみを透過する光フィルタおよびポンプ光源となる。したがって構成としては図1.1と同じである。文献[12]では高非線形媒質として半導体増幅器を用いていた。図1.1の構成の光回路を用いて、文献[12]に示される光信号再生回路を構成する事で、ファイバ型光信号再生回路を実現できる。

【0047】[実施例4]本実施例においては、本発明を具体化した多波長光源の形態を示す。図3に考えられる多波長光源の概念図を示す。ポンプ光源1から入射されるポンプ光は光信号5と光合波器2によって合波される。この合波された光は、長さを最適化された高非線形光ファイバ3の中でアイドラー光を多重発生する。ファイバの出射端では信号光とポンプ光と多数のアイドラー光が周波数軸上に全て存在する光11が出射されるため、狭帯域光フィルタ10を用いて所望の波長の光12のみを取り出すようにする事で多波長光源を実現できる。

【0048】[実施例5]本実施例においては、実際に実験で得られた結果を元にして半値半幅が20nmの広帯域波長変換装置の実現を考える。ファイバ長を変えながら、波長変換実験を行う事を考える。高非線形光ファイバを用いて、実施例1に示すような系の元で広帯域波長変換を行った。図1.2～1.4にファイバ長を変えていった場合における波長変換実験の結果を示す。光源は連続光源を用いている。各々場合のポンプ光入力パワーはSB Sで制限される。このため、24.5kmでは10.0dBm、1.2kmでは18.5dBmおよび0.2kmでは20.0dBmとなった。図より分かるように、ファイバ長を短くしていくに連れて変換効率と帯域がともに増加していくのが分かる。図1.2～1.4には、同時に応するパラメータを入れて数値計算を行った結果を実線で示した。横軸は波長であり、縦軸は波長変換における変換効率である。実験に沿って計算のパラメータを選んだ。また、計算時には実際の系で生じる接続などファイバ固有の損失以外の原因に伴う全損失をオフセットした値である。

【0049】図1.2～1.4を見て先ず気付くのは、24.5kmや1.2kmの場合では数値計算結果と実験結果が全く合わないことである。この理由としては色々と考えられるが、一番効いているのは波長分散の長手方向の変動であ

ると考えている。短尺になって分散が揃うに連れて、だんだんと計算結果が一致していく。

【0050】この事をより視覚的に見る目的で、図1.2～1.4に示した計算と同じパラメータの元で、ポンプ光から23nm離れた位置に立てた信号光が変換されて生成されるアイドラー光が、長手方向にわたって成長していく様子を計算した。図1.5～1.7に結果を示す。図1.5～1.7では、ポンプ光から20nm離れた波長変換を考えた。最も理想的な挙動を示した図1.4の結果は長手方向にわたって生成されるピークの列の中で、1番目のピークの近傍で動作していることが分かる。図1.5の様になると、もはや損失の影響が支配的であり、波長変換どころではない。図1.6では波長変換は起きるが、長手方向における3番目にピークの近傍である。同様の変換効率はファイバ長が200mであっても得られる。そうであれば、200mの方が分散の長手方向の変動や、伝搬する事によるポンプ光と信号光の間の偏光状態の乱れもなくなる。この意味で、より最適な波長変換が実現すると期待される。実際、図1.5および図1.4の結果はその期待が間違っていないかった事を証明している。図1.6による予測の元でファイバ長を200mに切り割りした。この事によってSBSしきい値が上がり、20dBmまでのポンプ光の入射が可能になった。そして、帯域は図1.4で示した系の2.6倍以上にも達した。この事から同じ変換効率を有するのであれば、ファイバ長は短い方が良い。更に図1.7に見られる様に、1番目のピークよりもファイバ長が短くなるように設定された系で波長変換を行う方が高性能な波長変換装置が得られる事も分かる。ただし、もしも20dBm以上の出力がないポンプ光を連続光の状態で使用するのであれば、図1.7から分かるように200m以下にしては変換効率を落とすだけである。この意味で、ファイバ長を短くするとはいえ下限も明らかに存在する。そして、その値は数値計算を介して容易に決定できる。

【0051】なお、以上の方法は図1.2～1.4、図1.5～1.7において縦軸を変換効率ではなく、信号光の利得にして議論を行えばOPAの設計にそのまま使える。図1.2はファイバ長24.5kmにおけるアイドラー光変換効率の測定結果を示す。（実線は計算結果。3dB半幅0.85nm。）図1.3はファイバ長1.2kmにおけるアイドラー光変換効率の測定結果を示す。（実線は計算結果。3dB半幅8.7nm。）

図1.4はファイバ長0.2kmにおけるアイドラー光変換効率の測定結果を示す。（実線は計算結果。3dB半幅23nm。）この状況下では、計算結果と実験結果が一致する。その様にパラメータを選んだとはいって、良く一致する。図1.5はアイドラー光変換効率の計算結果を示す。ファイバ長24.5km（●で記述）では損失が支配的なモードになる。ポンプ光強度10.0dBm（図1.2に対応）の元で計算。図1.6はアイドラー光変換効率の計算結果を示す。ファイバ長1.2km（●で記述）で3番目のピーク付近

に対応。ポンプ光強度18.5dBm(図13に対応)の元で計算。図17はアイドラー光変換効率の計算結果を示す。ファイバ長0.2km(●で記述)で1番目のピーク付近に対応。ポンプ光強度20.0dBm(図14に対応)の元で計算。

**【0052】** [実施例6] 30nmの帯域を有する広帯域波長変換を実現する事を考える。例としてここではポンプ光を挟んで短波長側から長波長側へ波長変換する事を考える。波長分割多重(WDM:Wavelength Division Multiplexing)を用いた伝送システムで光ネットワークを構築する際に、波長領域で広帯域にわたって多重化された光信号を一括して変換する必要がある[4-7]。この際の広帯域一括波長変換について数値計算を用いて議論を行う。ファイバ長は200mであり、ポンプ光強度を20dBmに設定することを考える。ファイバのパラメータは表3.1で与えられるものとする。

**【0053】**

表3.1 実施例6の計算で用いられるパラメータ

パラメータ	値
零分散波長	1549.0 nm
分散スローブ	0.030 ps/nm <sup>2</sup> /km
非線形屈折率 n <sub>2</sub>	3.2×10 <sup>-20</sup> m <sup>2</sup> /W
有効コア断面積 A <sub>eff</sub>	12.57 μm <sup>2</sup>
損失 α	0.50 dB/km

**【0054】** ポンプ光は1550nmに設定することにする。ここで、実施例5に示したように数1を解いて長手方向の変換効率の結果を示して長さを選ぶ。そのときに、信号光帯域で最もポンプ光から離れた波長を用いて設計するべきである。その事に無頓着に、例えばポンプ光から20nmで計算を行った結果を図18に示す。図18は信号光をポンプ光から20nmだけ離した際の変換効率の計算結果を示す。200mの場合を●で示す。

**【0055】**これまでの議論では、最初の山に近いところで系を組む様にすればよいという事であった。この方法に従えば、最適なのは400m程度のファイバ長である。したがって、ポンプ光を増加させることを考えても、ファイバを短くするような事を考えてはいけない。次に、仕様にあるように30nm離れた場所に信号光を設定した場合の数値計算結果を図19に示す。図より200mというファイバ長は最初の山を既に越えてしまった長さになっている。本発明の指針としては、それならば同じ値をとる短い方の長さ(図では100m)を使うようになっている。最適なのは150mのファイバ長である。すなわち、図19の結果はもっとファイバ長を短くすることを指示している。

**【0056】** 以上の結果をまとめるために、図20にファイバ長L=200mの場合とL=150mの二つの場合の変換効率

を示す。図19は信号光をポンプ光から30nmだけ離した際の変換効率の計算結果を示す。200mの場合を●で示す。図20は数値計算による帯域のスペクトル計算結果を示す。破線で示したファイバ長L=200m(3dB帯域26.0nm)よりも実線で示したL=150m(3dB帯域30.0nm)の方が帯域を広くとれる。図20より分かるようにファイバ長L=150mの場合の方が、L=200mの場合よりも広帯域で変換効率が波長に対して平坦である。この様に、30nmにわたる広帯域の波長変換を実現する際には、信号光の波長入10 s=λ p-30nmを帯域の一一番端にとって計算を行うことで設計をする必要がある。以上の議論はそのままOPAの設計に用いることが可能である。

**【0057】** [実施例7] つぎにPMDの影響でファイバ長を調整しなくてはならない状況を考える。広帯域の波長変換を行う際には、ポンプ光と信号光の間隔が離れるに連れて必然的にPMDの影響も増加する。既に説明を行ったように、PMDの影響は主偏光状態の考えを用いることで低減することが出来る。そのため、まず実施例5で示したようにしてFPMだけを考えてファイバ長Lを決定する。つぎに、そうやって求めた長さL1の光ファイバに対して文献[22]で通常の分散シフト光ファイバに対して行っている事と同様の評価を行い、手持ちの高非線形ファイバの主偏光状態の帯域△λ PSPを評価する。この際の波長はポンプ光波長に合わせる。この帯域D1PSPと仕様として考えている波長変換の帯域△λ WCを比較して、△λ WC < △λ PSPであれば、ポンプ光と信号光をファイバに入射する直前に各々の偏光を揃える事しかPMDの影響を低減できない。ファイバ長はそのままで波長変換を考えればよい。

**【0058】** [実施例8] 図21は、本発明の短パルス発生装置の一実施例を示す。図に示すように分散シフト光ファイバ3とシングルホール光ファイバ13とを交互に接続した一本の伝送路(comblike dispersion-profiled fiber[26])に対して、異なる波長を持つポンプ光とプロープ光を同程度の光強度にして同伝送路に入射した場合、波長間隔に対応して発生した周波数のビート信号が、最初に配置されている分散シフト光ファイバ内で、多重の四光子混合を引き起しへスペクトルが広がる。ここでは自己位相変調が支配的となり周波数チャープを生じる。

**【0059】** この広がったスペクトルの光をシングルモード光ファイバに入射すると、群速度分散が支配的となりチャープしたパルスを圧縮することになる。このような分散シフトファイバとシングルモード光ファイバを組み合わせた伝送路を何本も伝送されることにより、パルスはチャープと圧縮を繰り返し、入射時に正弦波形であったものが、ソリトン形状の短パルスに成形される。以上の技術を実現する際に、分散シフト光ファイバで効率良く四光子混合を引き起こす事が重要であり、そのためには本発明に記載の方法により四光子混合を発生させる手

法を用いることで高性能の短パルス発生装置を実現できる。

【0060】もし  $\Delta \lambda_{WC} > \Delta \lambda_{PSP}$  であれば、ファイバ長を短くすることでPMFの影響を低減できる。一般に  $\Delta \lambda_{PSP}$  はファイバ長に対して単調に減少する事が知られている[21, 22]。このため、ファイバ長を短くする事で  $\Delta \lambda_{WC} < \Delta \lambda_{PSP}$  の条件を実現させる。こうやってPMFを優先して求めた長さをL2とする ( $L2 \leq L1$ )。そのファイバ長の元で、波長変換を実現する。この際にポンプ光強度を変えることが出来れば、ファイバが短くなった分を補うように最適化をし直すことも可能である。

#### 【0061】

【発明の効果】本発明により、光ファイバ中の非線形効果である四光子混合を利用したファイバ型デバイス、具体的には波長変換、光パラメトリック增幅器は元より、他の四光子混合を利用した光ファイバ型デバイスを構成する際に、十分大きな効率で四光子混合を発生することが可能になる。ここで評価した条件を満たす短尺の高非線形光ファイバを用いることで、誘導ブリュアン散乱、ファイバ中を伝搬することで生じるポンプ光と信号光の間の偏光の乱れ、実際の光ファイバを製造する際に生じる長手方向の波長分散のゆらぎの効果を最小限に押さえ、ポンプ光源の特徴を最大限に活かした形で四光子混合を発生することが可能になる。

#### 【0062】【参考文献】

- [1] 山本貴司、今井健之、中沢正隆、「光波長変換回路」、公開特許公報、特開平10-133240、1998。
- [2] 山本貴司、中沢正隆、電子情報通信学会論文誌、J81-C-I、1998、p.148。 [3] T. Yamamoto and M. Nakazawa, Photonics Technology Letters, 9, 1997, p. 327。
- [4] 渡辺茂樹、武田鎮一、近間輝美、電子情報通信学会技術研究報告、OCS98-62、1998、p. 31。
- [5] S. Watanabe, S. Takeda and T. Chikama, European Conference on Optical Communications 98, PD, 1998, p. 85。
- [6] 武田鎮一、渡辺茂樹、石川丈二、大井寛己、電子情報通信学会技術研究報告、OCS97-88、1997、p. 19。
- [7] S. Watanabe, Third Optoelectronics and Communications Conference Technical Digest, 14A-1, 1998, p. 84。
- [8] R. Stolen and J. E. Bjorkholm, Journal of Quantum Electronics, QE-18, 1982, p. 1062。
- [9] G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics, Second Edition", Academic Press, San Diego, CA, USA, 1995.
- [10] M. E. Marhic, N. Kagi, T.-K. Chiang and L. G. Kazovsky, Optics Letters, 21, 1996, p. 573。
- [11] M. E. Marhic, Y. Park, F. S. Yang and L. G. Kazovsky, Optics Letters, 21, 1996, p. 1354。

[12] 中元 洋、「光信号再生回路」、公開特許公報、特開平9-83447、1997。

[13] 坂野寿和、大輝晶子、松本隆男、「多波長光源およびそれを用いた光波長多重信号発生回路」、公開特許公報、特開平8-288930、1996。

[14] N. Kagi, T.-K. Chiang, M. E. Marhic and L. G. Kazovsky, Electronics Letters, 31, 1995, p. 1935。

[15] S. Arai, Y. Akasaka, R. Sugizaki and T. Kamiya, First Optoelectronics and Communications Conference Technical Digest, 17P-33, 1996, p. 276。 [16]

奥野俊明、大西正志、柏田智徳、西村正幸、電子情報通信学会技術研究報告、OCS97-89、1997, p. 25。

[17] M. Onishi, T. Okuno, T. Kashiwada, S. Isjikawa, N. Akasaka and M. Nishimura, Optical Fiber Technologies, 4, 1998, p. 204。

[18] K. Inoue, Journal of Quantum Electronics, 28, 1992, p. 883。

[19] C. D. Poole and R. E. Wagner, Electronics Letters, 22, 1986, p. 1029。

20 [20] O. Aso and H. Nakamura, Electronics Letters, 32, 1996, p. 578。

[21] S. Betti, F. Curti, B. Daino, G. De Marchis, E. Iannnone and F. Matera, Optics Letters, 16, 1991, p. 467。

[22] O. Aso, Optics Letters, 23, 1998, p. 1102。

[23] G. Cappellini and S. Trillo, Journal of the Optical Society of America B, 8, 1991, p. 824。

[24] K. O. Hill, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki and R. I. MacDonald, Journal of Applied Physics, 49, 1978, p. 5098。

[25] C. D. Poole and G. R. Giles, Optics Letters, 13, 1988, p. 155。

[26] S. V. Chemikob, J. R. Taylor and R. Kashyap, Opt. Lett., 19, 1994, p. 539。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明に基づく光パラメトリック増幅器の一実施例を示す概念説明図である。

【図2】 本発明に基づく光パラメトリック増幅器の他実施例を示す概念説明図である。

【図3】 本発明に基づく多波長光源の一実施例を示す概念説明図である。

【図4】 異常分散領域でポンプ光強度が所定値よりも大きい場合の光ファイバ長に対するプローブ光利得特性図。

【図5】 異常分散領域でポンプ光強度が所定値よりも大きい場合の光ファイバ長に対するアイドラー光利得特性図。

【図6】 異常分散領域でポンプ光強度が所定値よりも小さい場合の光ファイバ長に対するプローブ光利得特性図。

【図 7】 異常分散領域でポンプ光強度が所定値よりも小さい場合の光ファイバ長に対するアイドラ光利得特性図。

【図 8】 正常分散領域の場合の光ファイバ長に対するプローブ光利得特性図。

【図 9】 正常分散領域の場合の光ファイバ長に対するアイドラ光利得特性図。

【図 10】 プローブ光の強度を変化させた場合の正規化ファイバ長に対するプローブ光利得特性図。

【図 11】 プローブ光の強度を変化させた場合の正規化ファイバ長に対するアイドラ光変換効率特性図。

【図 12】 光ファイバ長が異なる場合のプローブ光とアイドラ光との波長差に対するアイドラ光変換効率特性図。

【図 13】 光ファイバ長が異なる場合のプローブ光とアイドラ光との波長差に対するアイドラ光変換効率特性図。

【図 14】 光ファイバ長が異なる場合のプローブ光とアイドラ光との波長差に対するアイドラ光変換効率特性図。

【図 15】 光ファイバ長が異なる場合の光ファイバ長手方向に対するアイドラ光変換効率特性図。、

【図 16】 光ファイバ長が異なる場合の光ファイバ長手方向に対するアイドラ光変換効率特性図。

10 例を示す構成図である。

#### 【符号の説明】

符号 部品名・部分名

1 ポンプ光源

2 光合波器

3 高非線形光ファイバ

4 アイドラ光のみを透過する光フィルタ

5 光信号

6 FPM相互作用を行い、変換光が発生した光

7 波長変換された光信号

20 8 信号光のみを透過する光フィルタ

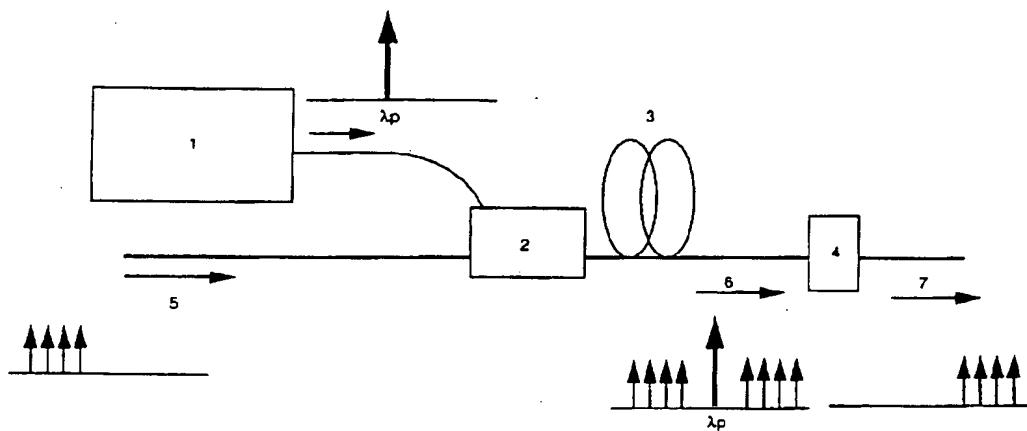
9 パラメトリック増幅された光信号

10 所望の波長の光のみを取り出す狭帯域光フィルタ

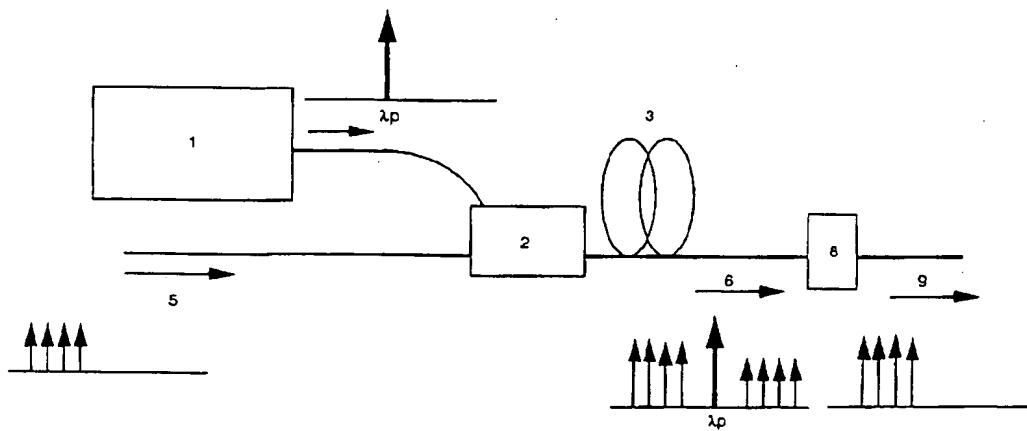
11 FPM相互作用で多重発生した光

12 切り出された光

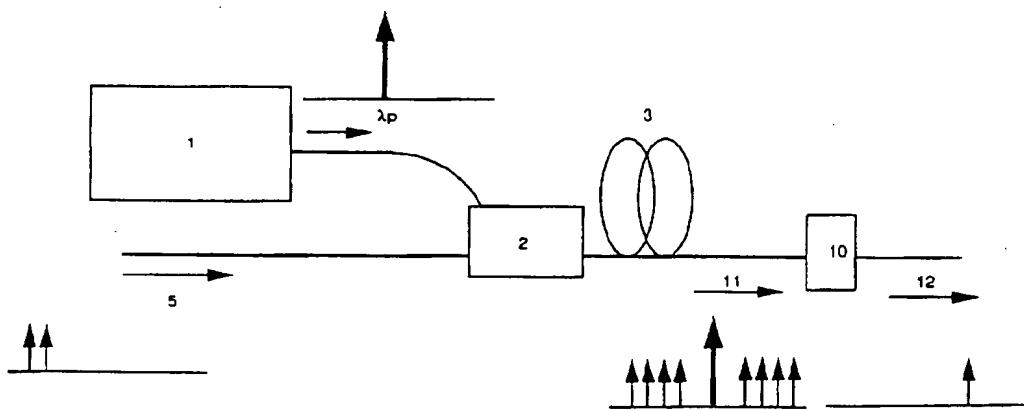
【図 1】



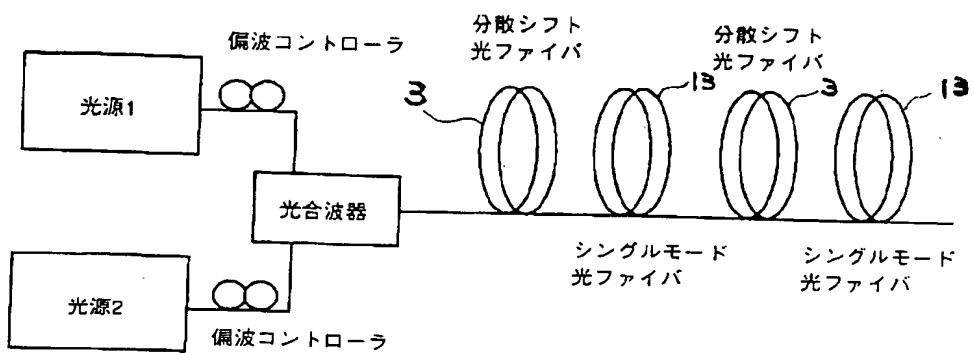
【図2】



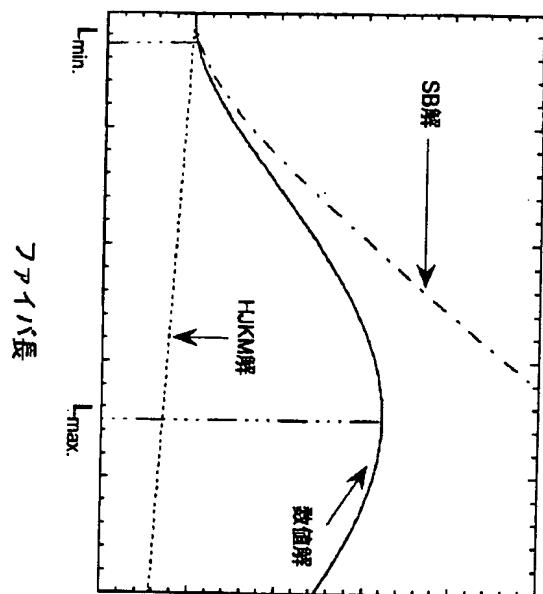
【図3】



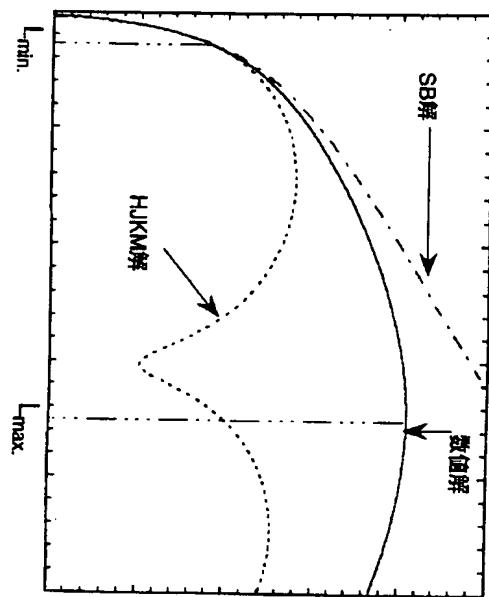
【図21】



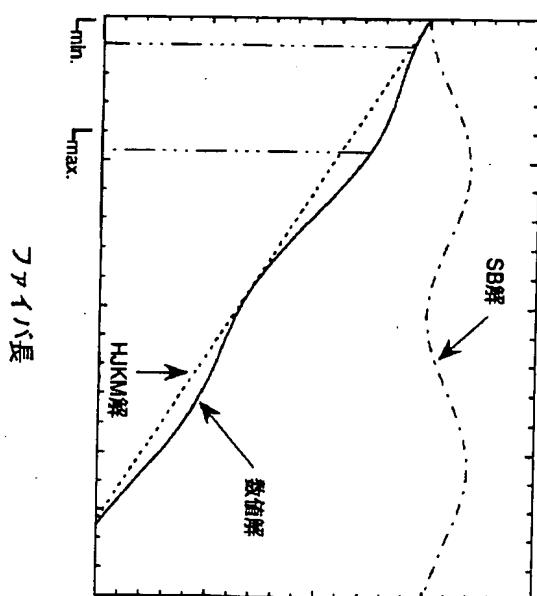
【図4】

プローブ光利得,  $G_s$ , dBスケール

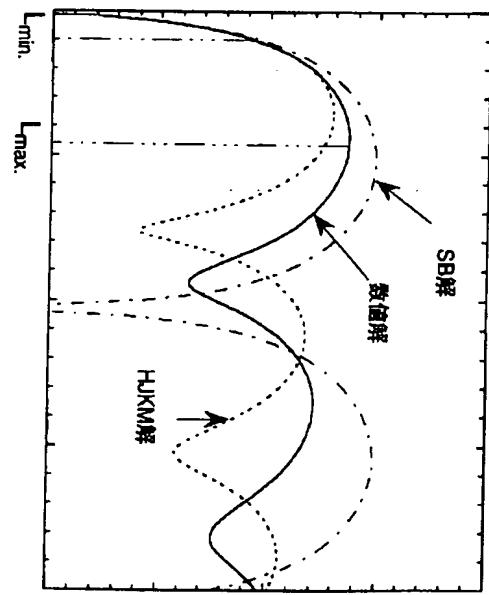
【図5】

アイドラー光変換効率,  $G_c$ , dBスケール

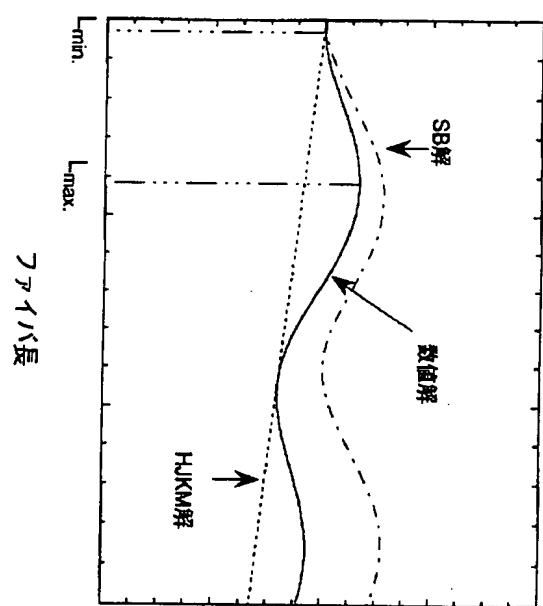
【図6】

プローブ光利得,  $G_s$ , dBスケール

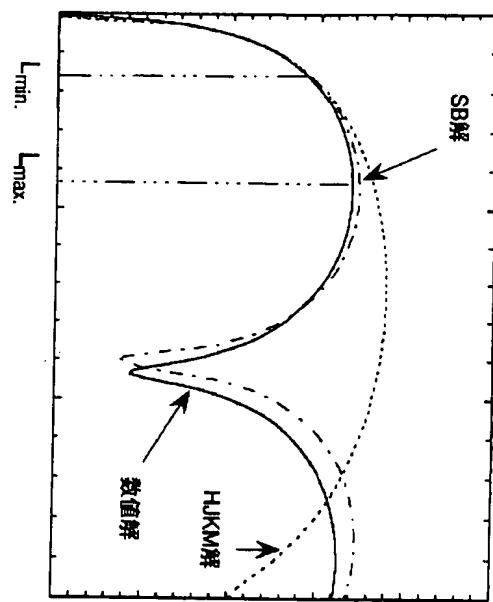
【図7】

アイドラー光変換効率,  $G_c$ , dBスケール

【図 8】

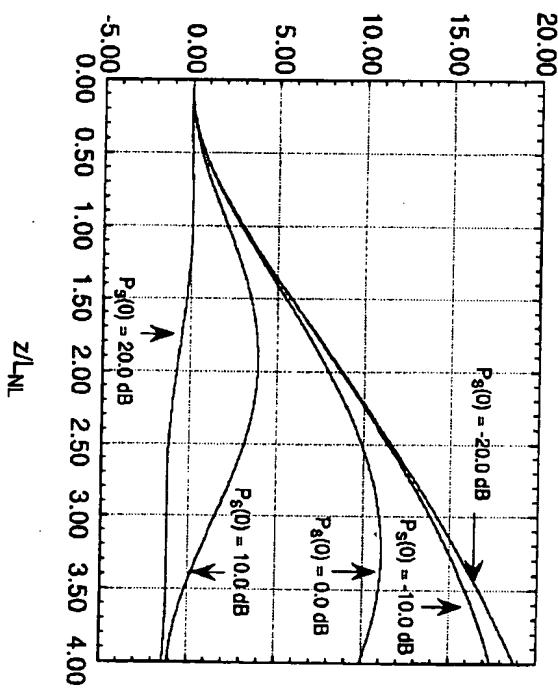
プローブ光利得,  $G_s$ , dBスケール

【図 9】

アイドラー変換効率,  $G_c$ , dBスケール

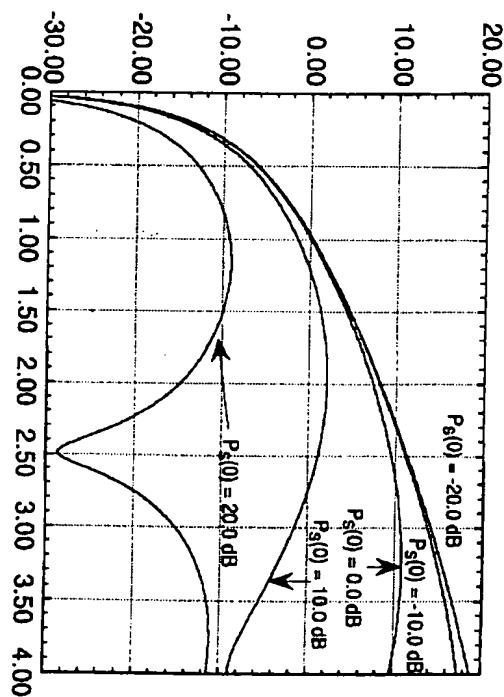
【図 10】

プローブ光利得, dB

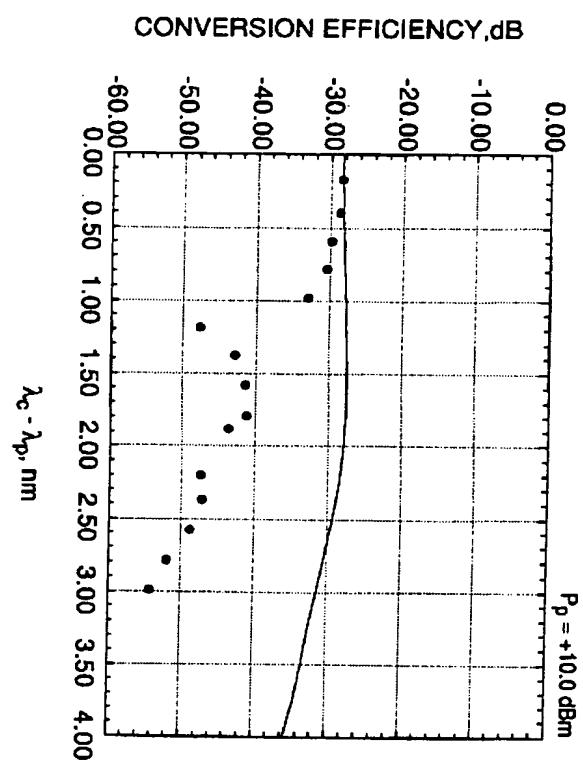


【図 11】

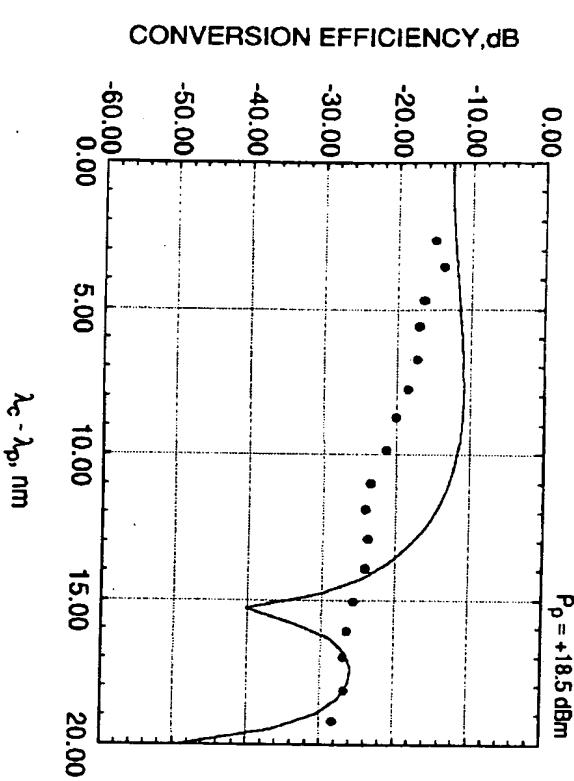
アイドラー変換効率, dB



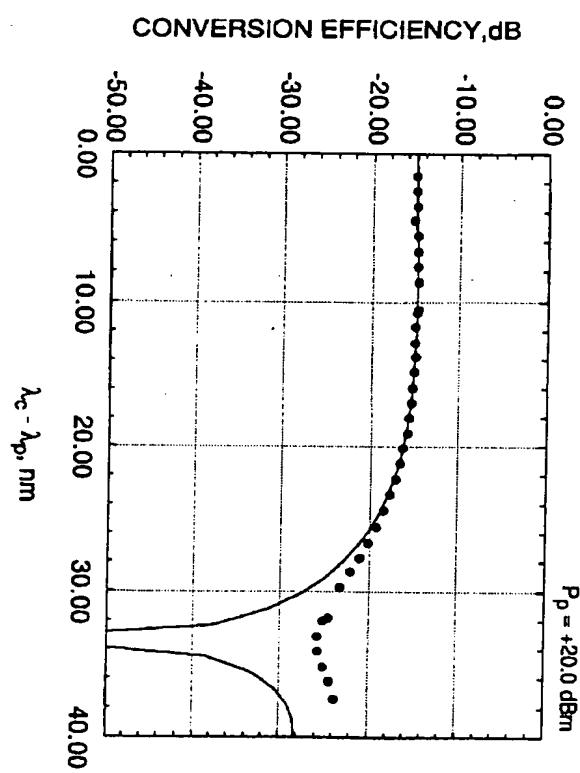
【図12】



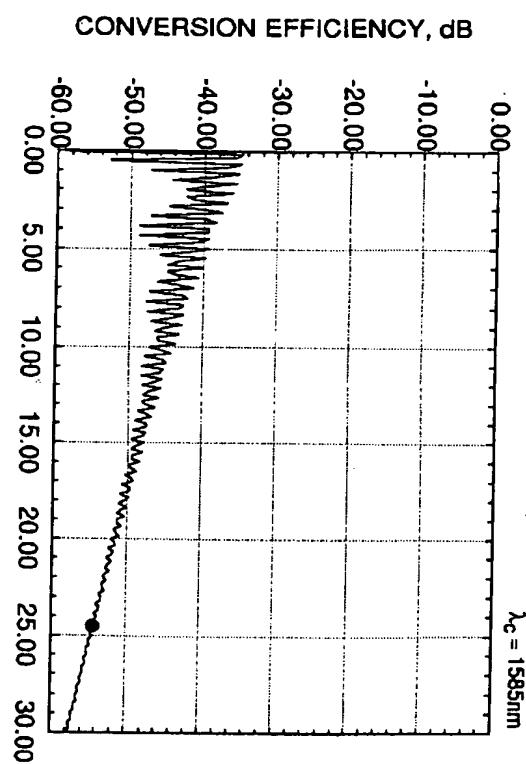
【図13】



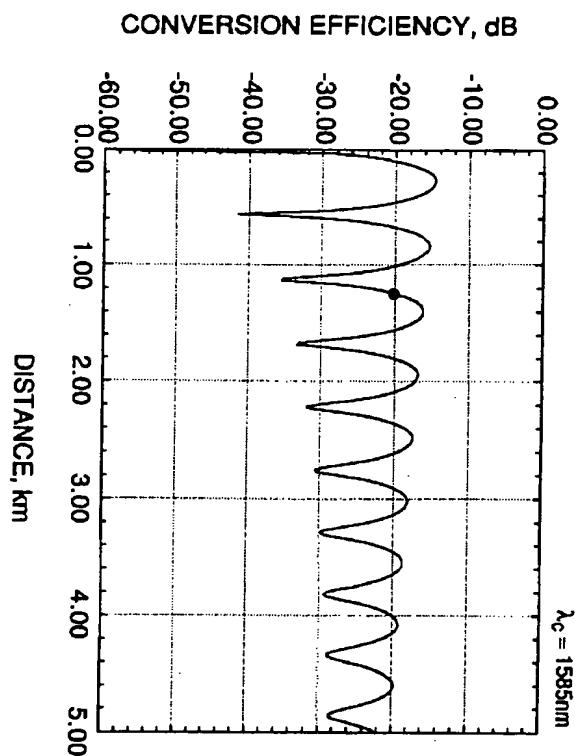
【図14】



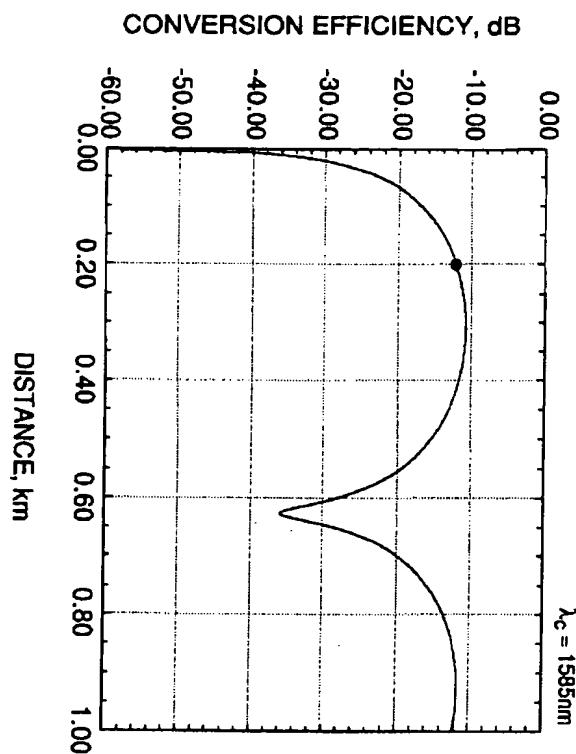
【図15】



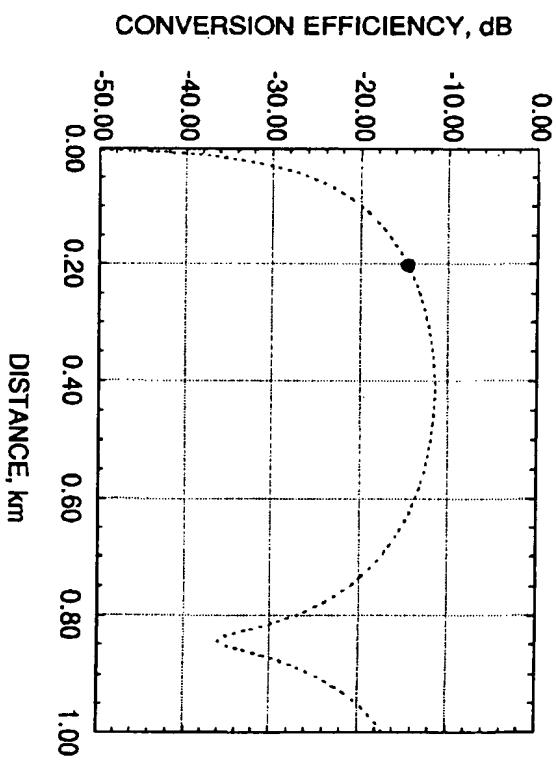
【図16】



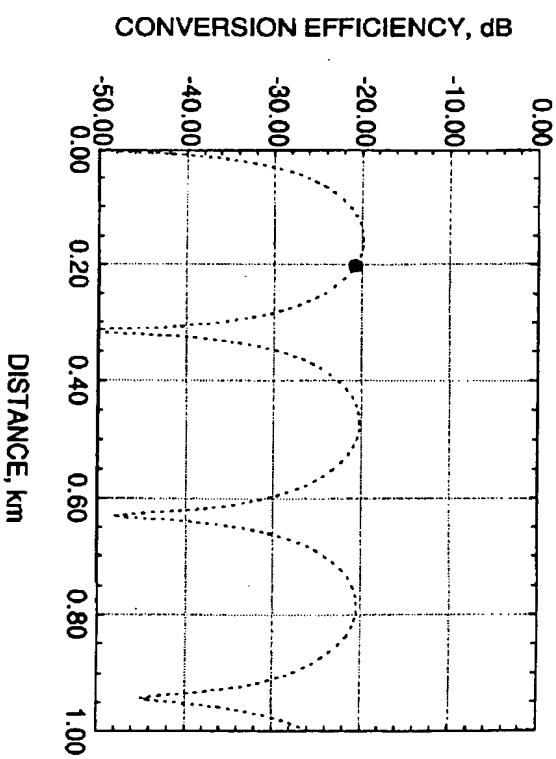
【図17】



【図18】



【図19】



【図20】

